



职业教育“十二五”规划教材

超声波检测技术

CHAOSHENGBO JIANCE JISHU

生利英 主编

- 配套电子课件
- 习题参考答案



化学工业出版社

职业教育“十二五”规划教材

超声波检测技术

生利英 主 编
齐勇田 副 编
王海岭 主 审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书分为五个单元,分别介绍了超声波检测的物理基础、超声波检测系统、通用超声波检测技术、超声波检测技术的应用和先进的超声波检测技术。本书所有编写内容与最新的锅炉压力容器检验标准 JB/T 4730.3—2005《承压容器无损检测》紧密结合,根据 ISO/CD/TR25108《无损检测——无损检测人员培训指南》要求编写。融入了职业资格标准中规定的知识和能力要求,使学生在获得学历文凭的同时获得相关的国家职业资格证书。

为方便教学,配套电子课件和习题参考答案。

本书可作为相关专业的课程教材,也可供相关工程技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

超声波检测技术/生利英主编. —北京:化学工业出版社, 2014.5

职业教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-20217-8

I. ①超… II. ①生… III. ①超声检验-职业教育-教材 IV. ①TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 063037 号

责任编辑:韩庆利

文字编辑:孙科

责任校对:吴静

装帧设计:孙远博

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张14 $\frac{1}{4}$ 字数376千字 2014年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 32.00 元

版权所有 违者必究

前 言

“超声波检测技术”是无损检测专业的一门专业核心课程。依照国家教育部关于高职高专培养技术技能型人才的目标，为适应社会对无损检测技术人才的需求，本编写团队在对多所高职高专院校的相关专业进行了长时间调研，结合高职学生的知识特点，充分了解和比较了市场上此类教材的各种利与弊的基础上，编写了本书。

本书分为五个单元，每一单元又分为若干个模块。前四个单元分别介绍了超声波检测的物理基础、超声波检测系统、通用超声波检测技术和超声波检测技术的应用。第四单元超声波检测技术的应用在内容的安排上设计了六个教学模块，即检测前的准备、焊缝、锻件、板材、管材及铸件焊接接头的超声波检测。在每一教学模块中则依据“检测准备—实施检测—检测结果分析”的职业工作流程组织教学内容。由于超声波检测技术的发展，先进的超声波检测技术不断出现。因此在第五单元中介绍了两种目前进行推广的超声波检测技术：衍射超声检测技术和相控阵超声检测技术。为使学生充分掌握所学知识，结合国家超声波职业资格证书考试要求，每一模块后的习题包括判断题、选择题、问答题或计算题。

本书所有编写内容与最新的锅炉压力容器检验标准 JB/T 4730.3—2005《承压容器无损检测》紧密结合，根据 ISO/CD/TR25108《无损检测——无损检测人员培训指南》要求编写。融入了职业资格标准中规定的知识和能力要求，使学生在获得学历文凭的同时获得相关的国家职业资格证书。

本书由包头职业技术学院生利英任主编，齐勇田任副主编。其中绪论、第五单元由生利英编写，第一单元由四川工程职业技术学院郭伟编写，第二单元由包头职业技术学院郝美丽编写，第三单元由包头职业技术学院齐勇田编写，第四单元由包头职业技术学院生利英和内蒙古北方重工业集团计量检测技术研究院研究员级高级工程师曹正常共同编写。全书由内蒙古北方重工业集团计量检测技术研究院研究员级高级工程师王海岭主审，生利英统稿。

本书有配套电子课件和习题参考答案，可赠送给用本书作为授课教材的院校和老师，如有需要，可发邮件到 hqlbook@126.com 索取。

限于编者水平，书中不足之处在所难免，恳请广大读者给予批评指正。

编 者

目 录

绪论	1	五、探头型号标识	69
第一单元 超声波检测的物理基础	5	六、探头的选择	70
模块一 机械振动和机械波	5	习题	71
一、机械振动	5	模块三 试块	73
二、机械波	7	一、试块的作用	73
三、机械波的干涉、衍射及驻波的形成	9	二、试块的分类	73
习题	13	三、常用试块简介	74
模块二 超声波的产生和分类	14	四、常用对比试块	77
一、超声波的产生	14	五、试块的要求和维护	78
二、超声波的分类	15	习题	79
习题	19	模块四 耦合与补偿	80
模块三 超声场的特征	20	一、超声耦合	80
一、超声场的特征值	20	二、影响声耦合的因素	80
二、圆盘声源辐射的超声纵波声场	22	三、表面耦合损耗的测定与补偿	81
三、矩形声源辐射的纵波声场	24	习题	82
四、近场区在两种介质中的分布	25	模块五 超声波探伤系统的性能与测试	84
五、实际纵波声场	25	一、超声波探伤仪的性能及其测试	84
六、横波声场	26	二、探头的性能及其测试	85
习题	29	三、仪器和探头的综合性能及其测试	86
模块四 超声波在介质中的传播	31	习题	88
一、超声波的声速	31	第三单元 通用超声波检测技术	89
二、超声波入射到异质界面	36	模块一 常用超声波检测技术	89
三、超声波的衰减	45	一、按检测原理分类	89
习题	48	二、按波型分类	91
第二单元 超声波检测系统	50	三、按探头数目分类	92
模块一 超声波探伤仪	50	四、按探头与工件的接触方式分类	93
一、超声波探伤仪的作用	50	习题	94
二、超声波探伤仪的分类	50	模块二 超声波检测设备的调节	96
三、超声波探伤仪的工作原理	52	一、仪器扫描速度的调节	96
四、仪器面板简介	55	二、检测灵敏度的调节	99
五、数字式超声波探伤仪	57	习题	103
六、超声波探伤仪的选择	59	模块三 缺陷位置的测定	105
七、仪器的维护	60	一、纵波直探头缺陷定位技术	105
习题	60	二、横波探伤时缺陷定位技术	105
模块二 探头	62	三、横波探测圆柱形工件时的缺陷定位	107
一、压电效应与压电材料	62	四、影响缺陷定位的因素	109
二、压电材料的主要性能参数	63	习题	110
三、压电材料的选用原则	65	模块四 规则反射体的回波声压	112
四、探头的种类和结构	65		

一、平底孔的回波声压	112	习题	179
二、长横孔的回波声压	113	模块四 板材的超声检测	183
三、短横孔的回波声压	114	一、钢板中常见缺陷	183
四、球孔的回波声压	115	二、钢板的探伤方法	184
五、大平底的回波声压	115	三、检测准备	186
六、圆柱形曲面底面的回波声压	115	四、仪器的调整	187
习题	116	五、扫查探伤	188
模块五 缺陷大小的测定	118	六、缺陷的确定	188
一、当量法	118	七、钢板质量的评级	189
二、底波高度法	120	习题	190
三、测长法	121	模块五 管材的超声检测	194
四、影响缺陷定量的因素	122	一、管材常见缺陷	194
习题	124	二、小口径管超声波检测技术	194
模块六 缺陷的性质分析	126	三、大口径管超声波检测技术	201
一、缺陷性质分析的依据	126	四、小径管自动检测设备简介	202
二、非缺陷波的识别	127	习题	204
习题	130	模块六 铸件的超声检测	206
第四单元 超声波检测的应用	132	一、铸件中的常见缺陷	206
模块一 检测前的准备	132	二、铸件探伤的特点	207
一、人员资格鉴定	132	三、铸件的超声检测方法	208
二、技术文件准备	133	四、铸件检测条件的选择	209
三、仪器鉴定	144	五、检测灵敏度的调整	210
四、仪器性能的验证	144	六、缺陷的判别与测定	211
五、工件表面制备	145	七、铸钢件质量等级的评定	211
习题	145	习题	212
模块二 焊缝的超声检测	147	第五单元 先进的超声波检测技术	213
一、焊接接头中缺陷	147	模块一 超声波衍射时差法	213
二、检测方法	148	一、TOFD法的基础知识	213
三、检测前准备	149	二、TOFD的基本设置	214
四、探伤仪的调节	156	三、扫查方式	216
五、声能损失差的测定	158	四、图像显示	217
六、扫查方式	158	五、缺陷定位定量	218
七、缺陷的评定	159	六、典型焊缝缺陷图像分析	219
八、焊缝质量的评定	162	习题	220
习题	163	模块二 超声相控阵检测技术	222
模块三 锻件的超声检测	168	一、超声相控阵的检测原理	222
一、锻件中的常见缺陷	168	二、超声相控阵检测探头	224
二、锻件的超声检测方法	169	三、超声相控阵扫查方法	225
三、探测条件的选择	171	四、相控阵扫查图像显示模式	226
四、仪器的调节	173	习题	227
五、缺陷的评定	175	参考文献	229
六、锻件质量级别的评定	178		

绪 论

一、无损检测概况

1. 无损检测方法

在无损检测技术诞生以前,检查材料或产品的性能或内部质量的唯一方法是进行破坏性试验,即通过做机械性能和化学试验,就是通常所说的理化试验。理化试验只能抽样而不能100%对材料或产品进行检查。随着对产品质量要求的提高,抽样检查不能满足质量保证要求。于是,一种新型的检测技术发展起来了。它可以在不破坏材料或产品的外形、不影响材料或产品的性能、不改变材料或产品内部结构的情况下,检测到该材料或产品的内部状态和性能,该技术称为无损检测(Nondestructive Testing, NDT),也称无损探伤(Nondestructive Inspection)、无损检验(Nondestructive Examination)。

发展到现在无损检测的方法已有几十种。超声波检测、射线检测、磁粉检测、渗透检测及涡流检测通常称为五大常规检测技术,其余称为非常规检测技术。如声发射、红外、微波、声阻抗、泄漏检测等。每种检测技术都有其自身的特点。常规无损检测方法的基本原理、技术特点、适用范围见表0-1。

表0-1 常规无损检测方法的基本原理、技术特点、适用范围

检测方法	基本原理	技术特点	适用范围
超声波检测	利用超声波在介质中传播时产生衰减,遇到界面产生反射的性质,获取被检对象质量信息的无损检测方法	优点:适合于多种材料和构件的检测;可对大厚度工件进行检测;缺陷定位较准确;灵敏度高;成本低;速度快;设备轻便,可现场检测;对人体及环境无害 局限性:表面与近表面缺陷难以检测;对工件中的缺陷进行精确定性、定量仍需作深入研究;受试件形状结构限制;检测者需要有经验	金属、非金属、陶瓷、复合材料等多种材料检测;铸件、锻件、管材、板材、棒材、焊缝等构件检测;缺陷检测、厚度测量
射线检测	基于材料对透入射线的不同衰减,利用穿透电离辐射获取被检对象缺陷图像或结构完整性信息的无损检测方法	优点:不受零件材料、形状、表面状况限制;检测结果显示直观 局限性:三维结构二维成像,前后缺陷重叠;不能检测与射线透照方向垂直的裂纹;需要射线防护措施	金属、陶瓷、复合材料等多种材料检测;铸件、焊缝等构件工艺缺陷检测;缺陷检测、装配检测、密度检测、尺寸测量
磁粉检测	基于缺陷处漏磁场对磁粉的吸附作用,检测铁磁性材料表面和近表面缺陷的无损检测方法	优点:显示直观;检测灵敏度高,可检测小至微米级的裂纹;设备简单、操作简便、价格便宜 局限性:只能检测铁磁性材料	铁磁性材料表面和近表面缺陷的检测
渗透检测	基于毛细管现象,检测固体材料表面开口缺陷的无损检测方法	优点:缺陷显示直观;检测材料种类范围广;一次可检测多个零件;操作简便 局限性:只能检测零件的表面开口缺陷,一般只能检测非多孔型材料;对零件和环境有污染	检测各种非多孔性固体材料制件的表面开口缺陷

续表

检测方法	基本原理	技术特点	适用范围
涡流检测	基于电磁感应原理,获取导电材料表面和近表面质量信息的无损检测方法	优点:非接触,检测速度快,能在高温状态下检测;检测范围广 局限性:只能检测导电材料和表面及近表面缺陷;检测灵敏度相对较低,不能对检出缺陷的类型、形状、尺寸等给出准确的定性、定量判断	检测各种导电材料的表面及近表面缺陷;材质分选、厚度的测量

2. 无损检测的目的

(1) 保证产品质量

应用无损检测技术,可以探测到肉眼无法看到的试件内部的缺陷;对试件表面质量进行检验时,通过无损检测法可以探测出许多肉眼很难看见的细小缺陷。由于无损检测技术对缺陷检测的应用范围广,灵敏度高,检测结果可靠性好,因此在产品制造的过程检验和最终质量检验中普遍采用。

应用无损检测技术的另一优点是可以进行百分之百检验。众所周知,采用破坏性检测,在检测完成的同时,试件也被破坏了,因此破坏性检测只能抽样检验。与破坏性检测不同,无损检测不需要损坏试件就能完成检测过程,因此无损检测能够对产品进行百分之百的检验或逐件检验。许多重要的材料、结构或产品,必须保证万无一失,只有采用无损检测手段,才能为质量提供有效保证。

(2) 保障使用安全

即使是设计和制造质量完全符合规范要求的各种产品和设备,在经过一段时间使用后,也有可能发生破坏事故。例如由于高温和应力的作用导致材料蠕变;由于温度、压力的波动产生交变应力,使设备的应力集中部位产生疲劳;由于腐蚀作用使壁厚减薄或质材劣化等。

上述因素有可能使设备中原来存在的,制造规范允许的小缺陷扩展开裂,或使设备中原来没有缺陷的地方产生这样或那样的新生缺陷,最终导致设备失效。为了保障使用安全,对在用的受力设备如锅炉压力容器、压力管道、吊钩等必须定期进行检验,及时发现缺陷,避免事故发生。

除锅炉压力容器、压力管道、吊钩外,其他在用重要设备,如受拉构件、零部件的定期检验,也经常应用无损检测手段。

(3) 改进制造工艺

在产品生产中,为了了解制造工艺是否适宜,必须事先进行工艺试验。在工艺试验中,经常对工艺试样进行无损检测,并根据检测结果改进制造工艺,最终确定理想的制造工艺。例如,为了确定焊接工艺规范,在焊接试验时对焊接试样进行射线照相,随后根据检测结果修正焊接参数,最终得到能够达到质量要求的焊接工艺。

(4) 降低生产成本

在产品制造过程中进行无损检测,往往被认为要增加检查费用,从而使制造成本增加。可是如果在制造过程中间的适当环节正确进行无损检测,就可防止以后的工序浪费,减少返工,降低废品率,从而降低制造成本。例如,在厚板焊接时,如果在焊接全部完成后再进行无损检测,发现超标缺陷要返修,要花费许多工时或者很难修补。因此可以在焊接至一半时先进行一次无损检测,确认没有超标缺陷后再继续焊接,这样虽然无损检测费用有所增加,但总的制造成本降低了。又如,对铸件进行机械加工,有时不允许机加工后的表面上出现夹杂、气孔、裂纹等缺陷,选择在机加工前对要进行加工的部位实施无损检测,对发现缺陷的

部位就不再加工,从而降低了废品率,节省了机加工工时。

3. 无损检测人员的培训考核

无损检测人员的任务是对产品的质量把关,保证设备运行安全,人民生命及财产不受损失。由于无损检测工作重要,故对无损检测人员要求较高,必须经过相关考核机构的培训、考核,才能从事无损检测工作。

美国对无损检测人员的培训考核十分重视,从1945开始就提出。我国从20世纪50年代在前苏联帮助下开始采用无损检测技术。对无损检测人员的培训考核从20世纪80年代开始:1982年7月16日原国家劳动人事部颁发《锅炉压力容器无损检测人员资格考核规则》;1987年3月23日颁发(劳人锅〔1987〕9号)修订后的《锅炉压力容器无损检测人员资格鉴定考核规则》,1987年8月1日实施;1993年12月30日(劳部发〔1993〕441号)颁发修订后的《锅炉压力容器无损检测人员资格考核规则》,1994年10月1日实施;2003年8月8日(国质检锅〔2003〕248号)颁发《特种设备无损检测人员考核与监督管理规则》,替代《锅炉压力容器无损检测人员资格鉴定考核规则》。

目前我国各工业系统均有考核机构,如劳动、机械、电力、航天、航空、兵器等,其中机械工程学会资格与德国互相认可。国际上较通用的是美国ASME资格。

二、超声波检测概况

1. 超声检测系统的发展

超声检测系统经历了三个发展阶段:模拟式超声波探伤仪、数字式超声波探伤仪以及以计算机为核心的超声自动检测系统。

利用超声波来进行无损检测始于20世纪30年代。传统的模拟式超声波探伤仪,首先是由前苏联根据超声波反射原理在二战期间研制的,并应用于潜艇的检测。而后由美、英两国分别于1944年和1964年研制了脉冲回波式超声检测仪,并逐步用于锻钢和厚钢板的探伤。后来逐步发展到焊接结构的无损检测当中,使超声检测技术得以广泛应用。脉冲回波技术至今仍是通用性最好、使用最广泛的一种超声检测技术。在此基础上,超声检测发展为一个有效而可靠的无损检测手段,并得到了广泛的工业应用。模拟式超声波探伤仪,主要用于手工探伤。其以操作简单、携带方便被广泛应用于工业检测中,但利用模拟式超声波探伤仪检测的结构受人为因素影响较大。

20世纪70年代后,随着电子元器件及电子技术的发展,以及计算机技术的介入,使得超声波探伤仪器发生了较大的变化,出现了数字化超声波探伤仪。数字化超声波探伤仪具有数据存储和运算功能,实现了探伤过程中自动判伤、自动读出、显示缺陷的位置和当量值、存储并打印探伤报告。数字化超声检测不仅解决了超声探伤记录的问题,而且减少了人为误差,提高了探伤结果的可信性。目前,数字式仪器已日益成熟,正逐渐取代模拟式仪器成为主流产品。

20世纪80年代以来,对于规则的板、棒类等大批量生产的产品,逐渐发展了自动检测系统,配备了自动报警、记录等装置。具有检测速度快、检测精度高、高可靠性、稳定性好等优点。

近二十年来超声检测技术取得了显著的进步,出现了很多先进的技术,如衍射超声检测技术,人工合成孔径聚焦技术以及相控阵超声技术等。可以预言,随着人工智能、计算机技

术及信息科学的飞速发展,必将推动无损检测技术的进步,各种先进的超声检测方法也会逐渐完善并很快获得工程上的应用。

2. 超声波检测原理

超声波检测是通过超声波声场施加在被检测物体上,利用检测物体存在的不连续性(缺陷)或材料特性变化使超声场的能量分布形式发生相应改变的特点,测量超声场的某种(或某几种)参数的改变来评价被检测对象是否存在不连续性(缺陷)或材料特性状态的检测技术。

超声检测的适用范围非常广。从检测对象的材料来说,可用于各种金属材料和非金属材料;从检测对象的制造工艺来说,可以是锻件、铸件、焊接件、胶接件、复合材料等构件;从检测对象的形状来说,可以是板材、棒材、管材等;从检测对象的尺寸来说,厚度可小至1mm,也可大至几米。从缺陷的特点来说,既可以是表面缺陷、也可以是内部缺陷。

3. 超声波检测的优点与局限性

与其他无损检测方法相比,超声波检测方法的主要优点如下。

- ① 适用于金属、非金属、复合材料等多种材料制件的无损评价。
- ② 穿透能力强,可对较大厚度范围的试件内部缺陷进行检测,可进行整个试件体积的扫查。如对金属材料,既可检测厚度1~2mm的薄壁管材和板材,也可检测几米长的钢锻件。
- ③ 灵敏度高,可检测材料内部尺寸很小的缺陷。
- ④ 可较准确地测定缺陷的深度位置,这在许多情况下是十分需要的。
- ⑤ 对大多数超声技术的应用来说,仅需从一侧接近试件。
- ⑥ 设备轻便,对人体及环境无害,可作现场检测。

超声检测的主要局限性如下。

- ① 由于纵波脉冲反射法存在的盲区和缺陷取向对检测灵敏度的影响,对位于表面和非常近表面的某些缺陷常常难于检测。
- ② 试件形状的复杂性,如小尺寸、不规则形状、粗糙表面、小曲率半径等,对超声检测的可实施性有较大影响。
- ③ 材料的某些内部结构,如晶粒度、相组成、非均匀性、非致密性等,会使小缺陷的检测灵敏度和信噪比变差。
- ④ 对材料及制件中的缺陷作定性、定量表征,需要检验者较丰富的经验。

第一单元 超声波检测 的物理基础

超声波是机械波的一种，当它在传播过程中碰到缺陷等障碍物时就会像光线一样产生反射、折射等现象。因此，在超声波检测中，涉及了几何声学 and 物理学中的一些基本概念和基本定律，如物理学中的机械振动与波动、波的叠加、干涉；声学中的超声波反射、折射、波型转换等。深入理解相关概念和基本定律是掌握超声波检测的前提。

模块一 机械振动和机械波

学习目标

1. 能够正确地理解机械振动和机械波的关系
2. 能够正确地理解机械振动和机械波的物理量
3. 能够正确地描述波的叠加、干涉、绕射的概念和基本定律

一、机械振动

物体在某一中心位置两侧所做的往复周期性运动称为机械振动，简称振动。在日常生活中，物体振动的现象随处可见。例如弹簧振子的运动；钟摆周而复始的摆动；活塞在汽缸中来回往复的运动；击鼓后，鼓膜的起伏运动等都是物体振动的表现。除此之外，一切能够发出声音的物体在发出声音时所做的运动都是振动，例如超声波波源的运动就是振动。

1. 描述机械振动的物理量

(1) 振幅

振动物体离开平衡位置的最大距离称为振幅，它是用来表示振动强弱的物理量，通常用符号 A 表示。简谐振动的振幅是不变的，强迫振动稳定阶段的振幅也是一个常数，阻尼振动的振幅逐渐减小。

(2) 周期

振动物体完成一次全振动所需要的时间，称为振动周期，用 T 表示。它是表示物体振动快慢的物理量。单位为秒 (s)。

(3) 频率

振动物体在单位时间内完成全振动的次数称为频率，用 f 表示。国际单位为赫兹 (Hz)，1 赫兹表示 1 秒内完成 1 次全振动，即 $1\text{Hz}=1\text{次/秒}$ 。此外还有千赫 (kHz)、兆赫 (MHz) 等。它们之间的关系如下：

$$1\text{kHz}=10^3\text{Hz}, \quad 1\text{MHz}=10^6\text{Hz}$$

像周期一样，频率也是表示物体振动快慢的物理量。两者互为倒数，即

$$T = \frac{1}{f}$$

根据振动过程中物体的受力情况不同，机械振动包括简谐振动、阻尼振动和受迫振动。

2. 简谐振动

最简单、最基本的直线振动称为简谐振动，简称谐振。下面以弹簧振子为例分析谐振的一些规律。

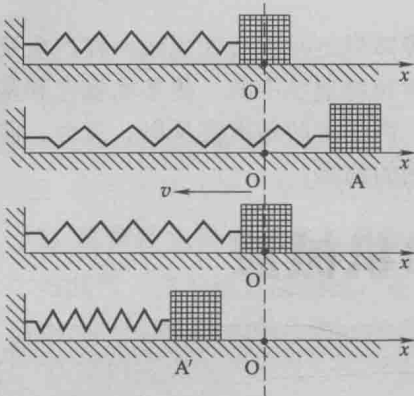


图 1-1 弹簧振子系统

图 1-1 为一典型弹簧振子系统，弹簧一端固定，另一端与振子相连，振子放在某一光滑（不考虑摩擦）的支撑面上。这种情况下，给振子一个水平方向的瞬间作用力，之后振子将做简谐振动。当弹簧振子离开平衡位置向右运动过程中，弹簧被拉长产生始终指向平衡位置的弹力，它力图使振子回到平衡位置。当振子运动到最大位移的位置 A 时，在弹簧弹力的作用下，振子改为向左运动，渐渐返回平衡位置。当振子到达平衡位置时，由于惯性作用，振子不会停留在平衡位置而继续向左运动使弹簧压缩，再次受到弹簧的弹力作用。在振子向左运动的过程中，弹簧的弹力逐渐增

大，振子的运动速度逐渐减小。当振子达到位置 A' 时，运动速度为零，不再向左运动，弹簧弹力迫使振子加速向右运动，其状态与振子从 A 到 O 相似，只是弹簧弹力的方向相反。这样振子就以平衡位置 O 为中心重复运动，形成振动。

把振动物体偏离平衡位置后所受到的总是指向平衡位置的力，叫做回复力。在图 1-1 中，设振子离开平衡位置的位移为 x ，对应的回复力为 F ，则：

$$F = -kx \quad (1-1)$$

式中 k ——弹簧的弹性系数。

由式 (1-1) 可知，简谐振动的回复力和位移成正比，而与位移的方向相反，即始终指向平衡位置。

振子离开平衡位置的位移 x 与时间 t 的关系用简谐振动方程表示：

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (1-2)$$

式中 ω ——圆频率， $\omega = 2\pi f$ ；

A ——振幅，即最大位移；

φ ——初相位；

$\omega t + \varphi$ ——振子在 t 时刻的相位。

由式 (1-2) 可知，谐振时物体的振幅不变，只有弹性力或重力做功，其他力不做功，符合机械能守恒规律。

3. 阻尼振动

谐振是理想条件下的振动，即不考虑物体受到的摩擦和其他阻力的影响。实际上任何物体的振动总会受到各种阻力的作用，振动物体的能量会不断减少，振幅也逐渐减小。这种振幅或振动能量不断降低的振动称为阻尼振动，如图 1-2 所示。

阻尼振动能量的减少通常有两种方式：一是由于摩擦阻力的作用使振动系统的能量不断减少。例如钟摆摆动的过程中振幅逐渐减少直至最终静止，就是由于空气的阻力作用使摆的

机械能转化为空气的内能；二是振动系统引起周围物质的振动，使能量以波的形式向四周发出。例如琴弦发出的声音不仅因为空气的阻力要消耗能量，同时也因为以波的形式辐射而减少能量，最后琴弦会停止振动。

4. 受迫振动

振动系统在周期性外力的作用下产生的振动称为受迫振动，这个周期性的外力称为策动力。如扬声器中纸盆的振动、汽缸中活塞的振动等都是受迫振动的例子。受迫振动刚开始时很复杂，经过一段时间后，进入到稳定状态，变为周期性的谐振。这时振动的频率与策动力的频率相同，而与物体的固有频率无关。

作受迫振动的物体一方面克服阻力做功，输出能量；一方面从策动力的做功中输入能量。当从策动力输入系统的能量等于物体克服阻力做功输出的能量时，系统的能量达到平衡，总能量保持不变，振幅保持不变，作等幅振动。

当策动力频率与受迫振动系统的固有频率相同时，受迫振动的振幅达到最大值，系统处于共振状态。此时的频率称为共振频率，如图 1-3 所示。在超声波检测中会应用共振。例如超声检测中使用的探头发射超声波时，其频谱中的最大幅值点的频率就是探头的共振频率。

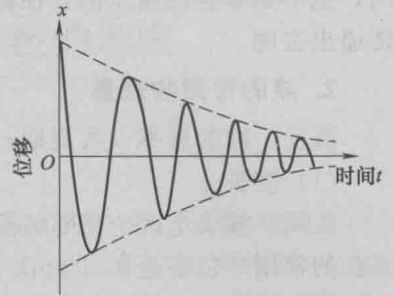


图 1-2 阻尼振动位移与时间关系

二、机械波

1. 机械波的产生和传播

机械振动在弹性介质中的传播过程，称为机械波。如空气中的声波、水面的涟漪等。

如图 1-4 所示，将组成物质的各个质点用无数的弹簧连接起来，构成弹性介质模型。当弹性介质的某一部分质点受外力作用发生振动时，由于它与相邻部分质点之间有相互作用的弹性力存在，振动就会传到与之相邻的其他质点，使它们也产生振动。同理，这些相邻质点的振动又会引起与之相邻的较远的质点跟着振动，于是振动就以一定的速度由近及远地向外传播出去而形成波。

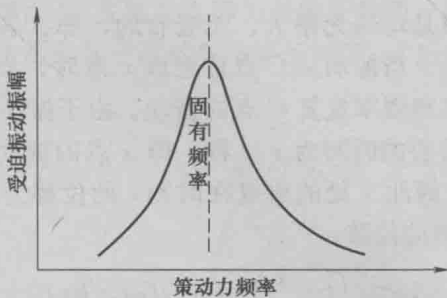


图 1-3 受迫振动

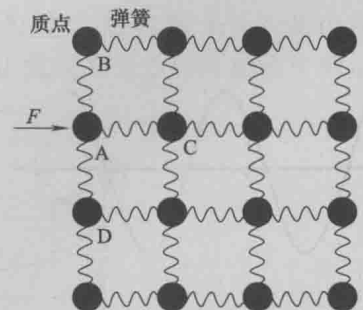


图 1-4 弹性介质模型

由以上分析可知，产生机械波必须具备两个条件：一是要有机械振动的振源；二是要有能传播机械振动的弹性介质，如固体、液体、气体都可视为弹性介质。

波动只是振动状态的传播，介质中各质点并不随波前进，各质点只以周期性变化的振动速度在各自的平衡位置附近振动。振动是产生波动的根源，波动是振动状态在弹性介质中的传播，也是振动能量在弹性介质中的传播。但是这种能量的传播，不是靠物质的迁移来实现

的，也不是靠振动质点的弹性碰撞来完成的，而是由各个质点的连续的周期性位移变化逐渐传递出去的。

2. 波的常用物理量

波长、波的频率（或周期）和波速是描述波动的三个重要物理量。

(1) 波长

在同一波线上两个相邻的振动相位相同的质点之间的距离，称为波长，用符号 λ 表示。波长的常用单位是毫米 (mm) 或米 (m)。

(2) 频率

单位时间内波动通过某一位置的完整波的数目，称为波动频率，也是质点在单位时间内的振动次数，用符号 f 表示。频率的常用单位是赫兹 (Hz)，即次/秒。在一秒内通过弹性介质某一位置一个波动，称这个波的频率为 1Hz。

周期在数值上等于频率的倒数，它是波动前进一个波长的距离所需要的时间，用符号 T 表示。周期的常用单位为秒 (s)。

由于波源作一次完全振动，波就前进一个波长的距离，所以波的周期（或频率）等于波源的振动周期（或频率）。

(3) 波速

在波动过程中，波在单位时间内所传播的距离叫做波速，用 c 表示，常用单位为米/秒 (m/s)。

根据波长、频率和波速的定义可得：

$$\lambda = cT = c/f \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 可知，波长与波速成正比，与频率成反比。当频率一定时，波速越大，波长就越长；当波速一定时，频率越低，波长就越长。

3. 波动方程

如图 1-5 所示，设有一简谐波沿 X 轴正方向向前传播，介质质点沿 Y 轴作上下振动。任取一质点的平衡位置作为坐标原点 O ，选择某一时刻作为起始时刻， O 点处（即 $x=0$ 处）质点的振动方程可表示为：

$$y = A \cos \omega t$$

假定介质是均匀无限大、无吸收的，那么各点的振幅将保持不变。当振动从 O 点传至该 x 点时，该质点将以相同的振幅和频率重复 O 点的振动。由于振动从 O 点传播到 x 点需要的时间为 x/c 秒，即 x 点的振动落后于 O 点 x/c 秒，因此 x 处的质点在时刻 t 的位移为 O 点在 $(t-x/c)$ 时刻的位移：

$$y = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) = A \cos (\omega t - kx) \quad (1-4)$$

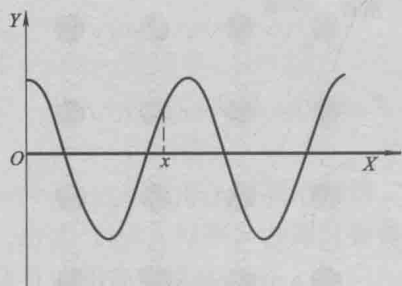


图 1-5 波动方程推导

式中 k ——角波数， $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ ；

c ——波速；

x —— x 点到 O 点的距离。

上式就是沿 X 轴正方向传播的平面简谐波的波动方程，它反映了波动过程中沿波传播方向上任意一点在任意时刻的位移情况。

三、机械波的干涉、衍射及驻波的形成

1. 波的衍射

(1) 惠更斯原理

波动的起源是波源的振动，波动的传播是由于介质中各质点间的相互作用。假设介质是连续分布的，介质中任何一点的振动都会引起临近各点的振动，因此在波动中任何一点都可以看作新的波源。例如，在水面上有一列自由传播的水波，如图 1-6 所示。在前进中遇到障碍物 AB，AB 上有一小孔，小孔的孔径 a 远小于波长 λ 。这时，可以看到穿过小孔的波是圆形的波，与原来波的形状无关。说明小孔可看作新的波源。

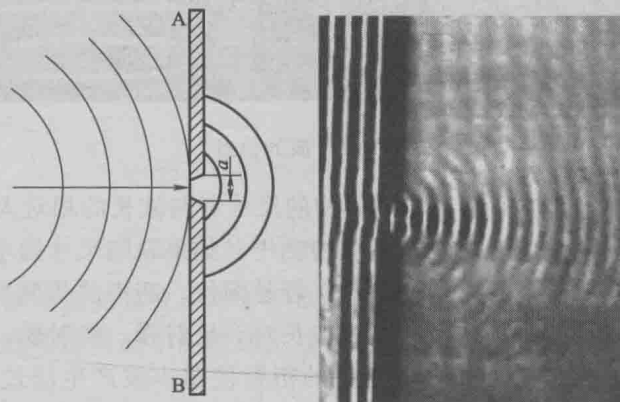


图 1-6 惠更斯原理

1690 年，荷兰物理学家克里斯蒂安·惠更斯 (Christian Huygens) 总结了上述现象，提出了著名的惠更斯原理：介质中波动传播到的各点都可以看作是发射子波的波源，在其后的任一时刻，这些子波的包迹就决定新的波阵面。根据惠更斯原理，只要知道某一时刻的波阵面，就可以确定波前的几何形状和波的传播方向。

如图 1-7 所示，设有波动从波源 O 以速度 c 传播。在时刻 t 的波阵面 S_1 ，根据惠更斯原理，波阵面 S_1 表面各点即为新的子波源。以 S_1 表面各点为圆心，以 $c\Delta t$ 为半径画出各球形子波，作切于各子波的包迹得经时间 Δt 后新的波前 S_2 。由波线垂直于波阵面便可确定波的传播方向。

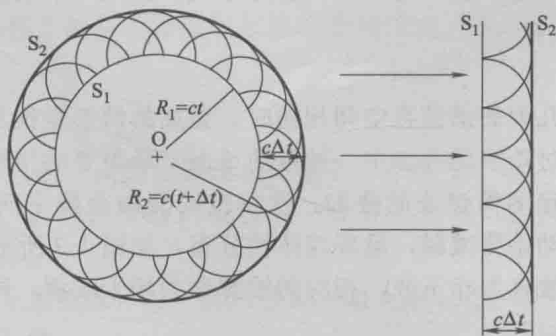


图 1-7 用惠更斯原理求球面波和平面波的新波阵面

(2) 波的衍射

衍射现象是波的特有现象。波在传播过程中遇到与波长相当的障碍物时，能绕过障碍物的边缘，改变方向继续传播的现象，称为波的衍射或波的绕射。

如图 1-8 所示，当水波到达狭缝处，根据惠更斯原理，狭缝上各点都可看作子波源，作出子波包络，得到新的波前。在狭缝的边缘处，波的传播方向发生改变，绕到了障碍物的背后。

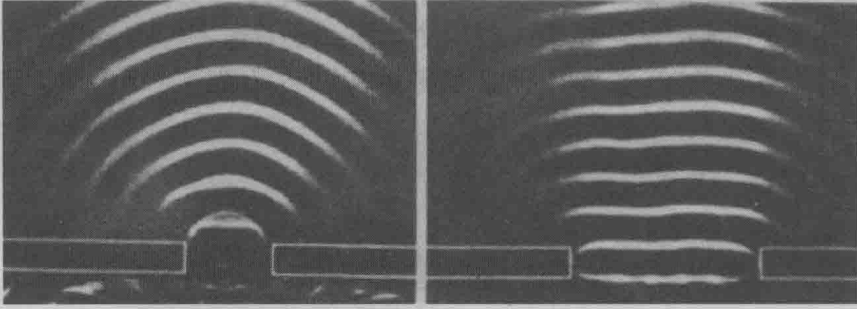


图 1-8 波的衍射

从图 1-8 中可以看出，波的衍射与障碍物的尺寸和与波长的相对大小有关。当障碍物的尺寸小于波长时，衍射效果显著。在超声波检测中，如果缺陷尺寸远小于波长，由于波的衍射较强，反射回波强度较弱，缺陷回波很低，容易漏检。超声波检测的灵敏度约为 $\lambda/2$ ，这是一个很重要的原因。当障碍物的尺寸大于波长时，反射强，绕射弱，声波几乎全反射。

波的绕射对探伤既有利又不利。由于波的衍射使超声波产生绕过晶粒顺利在介质中传播，对检测是有利的。但同时由于波的绕射，使一些小缺陷回波显著下降，以致造成漏检，这对探伤不利。

2. 干涉

(1) 波的叠加

几列波在空间传播时，无论是否相遇，都将保持各自原有的频率、波长、振动方向、传播方向传播，并不会因其他波的存在而改变，这一规律称为波传播的独立性。在几个人同时讲话时，能够听到每个人的声音，这就是声波的独立性的例子。空中同时有许多无线电波在传播，人们能接收到某一电台的广播，这是电磁波传播的独立性的例子。

当几列波在空间相遇时，在相遇区域内任一点的振动，为各列波单独存在时在该点所引起的振动位移的矢量和，这一规律称为波的叠加原理。显然，波的叠加原理实际上是运动叠加原理在波动中的表现。

(2) 波的干涉

一般来说，任意的几列简谐波在空间相遇时，叠加的情形是很复杂的，它们可以合成多种形式的波动。下面只讨论波的叠加中一种最简单而又最重要的情形，即两列频率相同、振动方向相同、相位差恒定的简谐波的叠加。这种波的叠加会使空间某些点处的振动始终加强，而另一些点处的振动始终减弱，呈现规律性分布，如图 1-9 所示，这种现象称为干涉现象。能产生干涉现象的波称为相干波，相应的波源称为相干波源。同频率、同振动方向、恒相位差称为相干条件。

如图 1-10 所示，设有两个相干点波源 S_1 、 S_2 的振动分别为

$$y_{S1} = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$y_{S2} = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

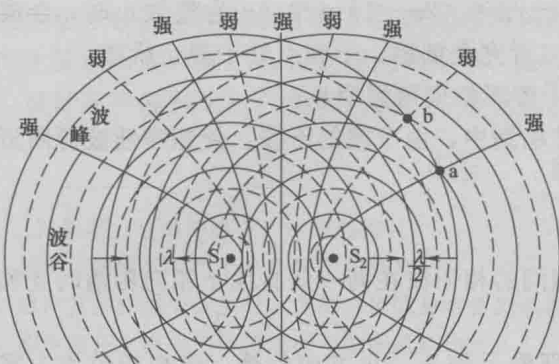


图 1-9 波的干涉图样

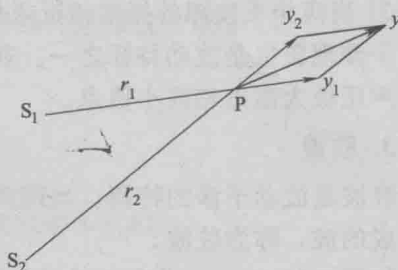


图 1-10 波的干涉

它们发出的两列相干波在空间某 P 点（称为干涉点）相遇，两列波在该点引起的分振动为

$$y_{P1} = A_1 \cos\left[\omega\left(t - \frac{r_1}{c}\right) + \varphi_1\right]$$

$$y_{P2} = A_2 \cos\left[\omega\left(t - \frac{r_2}{c}\right) + \varphi_2\right]$$

若不考虑介质对波能量的吸收，对于平面波，波的振幅等于波源的振幅，对于球面波，要考虑振幅的随距离的增加而减小的规律。这里只考虑平面波。根据叠加原理，干涉点的合振动为

$$y_P = y_{P1} + y_{P2} = A \cos(\omega t + \varphi)$$

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos \Delta\varphi} \tag{1-5}$$

$$\tan\varphi = \frac{A_1 \sin\left(\varphi_1 - \frac{2\pi r_1}{\lambda}\right) + A_2 \sin\left(\varphi_2 - \frac{2\pi r_2}{\lambda}\right)}{A_1 \cos\left(\varphi_1 - \frac{2\pi r_1}{\lambda}\right) + A_2 \cos\left(\varphi_2 - \frac{2\pi r_2}{\lambda}\right)} \tag{1-6}$$

式中 A_1, A_2 ——波源 S_1 和 S_2 在 P 点引起的振幅；

A ——P 点的合成振幅；

r_1, r_2 ——波源 S_1 和 S_2 到 P 点的距离；

φ_1, φ_2 ——波源 S_1 和 S_2 的振动初相位；

$\Delta\varphi$ ——两列相干波在干涉点引起振动的相位差， $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda}$ ；

λ ——波长。

由上式可知：

① 两列相干波在空间任一点的合振动相位差是一个恒量，每一点的合成振幅也是恒量。但是对于不同的干涉点，它们到波源的波程差一般并不相同，因而两列波的相位差也不相同，振动的合振幅也不同。

② 当 $\Delta\varphi = \pm 2k\pi$ (k 为整数) 时，合成振幅达最大值， $A = A_1 + A_2$ 。这时，两列波在 P 点互相加强，产生相长干涉。

③ 当 $\Delta\varphi = \pm(2k+1)\pi$ (k 为整数) 时，合成振幅达最小值， $A = |A_1 - A_2|$ 。这时，两列波在 P 点互相削弱，产生相消干涉。